

Application NOTE  
244PB230037

# IPMを採用するメリット と選定時の注意点

萩原レクトロニクス株式会社  
パワーデバイス拡販部

このアプリケーションNOTEは[Starpower社が発行している情報](#)を和訳した参考資料です。  
詳しくは、リンク先を参照してください。

## 概要

単相、または三相モーター駆動に適した電源スイッチと駆動回路が一体化されたパワーモジュールが登場して以降、インバータシステム設計の概念に革新的な影響を与えています。成熟したモジュール実装技術と急速なコスト削減を目的とした設計では、従来のコンポーネントからモジュール化されたブロック回路に置き換えられ、システム設計の主流になる傾向があります。このモジュールには、統合型/インテリジェントパワーモジュールと呼ばれています。(Integrated/Intelligent Power Module : IPM)。ただ、ほとんどの設計者はこのモジュールをブラックボックスとして扱い、モジュールの秘めた可能性を把握できないまま設計する事が多いです。これは、モジュールメーカーの仕様を受け入れるかどうか、つまりイエスとノーの概念しか持たなくなる危険性が有ります。この流れの中で設計者が持つべき姿勢は、競争優位性のある設計コンセプトを選択し、それをしっかりと把握することです。使用するモジュールの特性と制限を理解すれば、急速に変化する市場の要求に応じてIPMを正しく選択して使うことが出来る様になります。

## 目次

1. IPM を使用して設計する利点
2. IPMを選ぶ際の注意点
3. パリフェラル回路の設計
4. まとめ

# 1. IPM を使用して設計する利点

既に標準化され大量生産されているコンポーネントとIPMをコストだけで比べる事は困難です。これは、材料費だけで製品全体のデザインを考えるという単純な考え方は正しくない事を意味します。コストとは、性能、信頼性、価格の3つのレベルに分けて考える必要があります。

IPMの特徴：

- (1) PCB基板に必要な部品点数と面積を大幅に削減できる
- (2) 高い絶縁特性と、良好な放熱性能が期待できる
- (3) 回路レイアウトの複雑さを大幅に軽減できる
- (4) パワーチップとドライブ信号の配線による浮遊インダクタンスを低減できる
- (5) 内部に集積されたパワーチップの特性は均一で同等なレベル。
- (6) さまざまな異常にリアルタイムに対応できる保護機能が実装されている

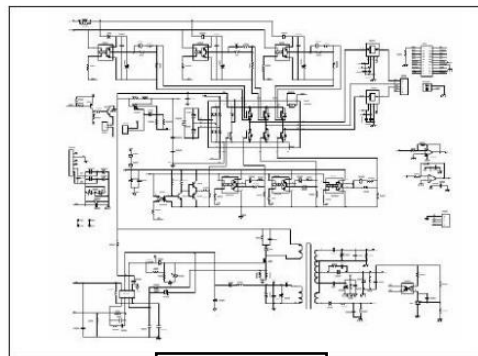


図 (1)

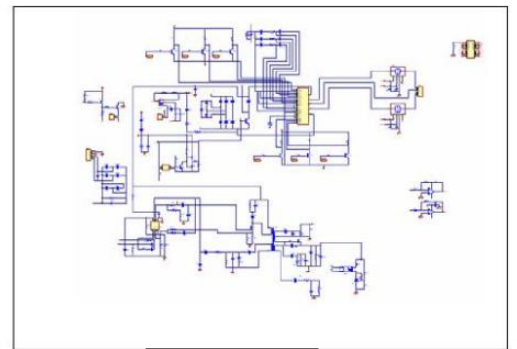


図 (2)

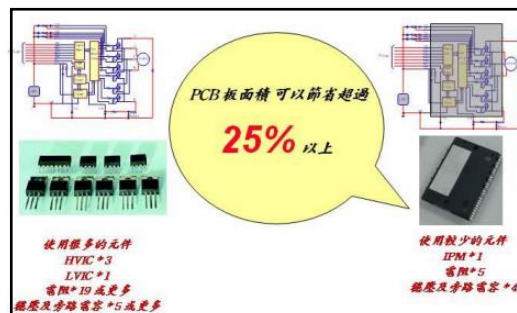


図 (3)

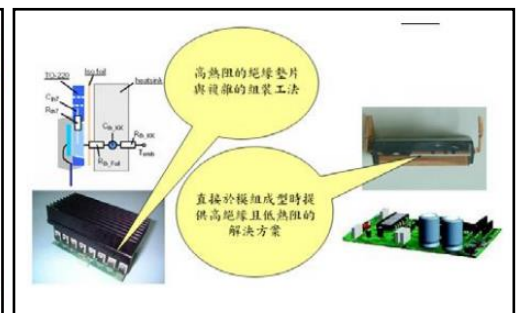


図 (4)

前述した(1)の項目の利点は明らかです。図(1)は参考のための定量的なデータを示しています。(2)の利点は、さまざまなプロセスによってもたらされる違いに由来します。従来のディスクリートコンポーネントと比較して高い絶縁性と容易な熱伝導設計を実現するには、より高性能な絶縁構造の確保と材料の選択、高度な加工技術、及び信頼性を保つための組み立て時間を費やすので高価になります。

IPMは、上記の特徴を有しているので従来の設計思考とは異なる長所を提供します。この事は図(2)で示しています。

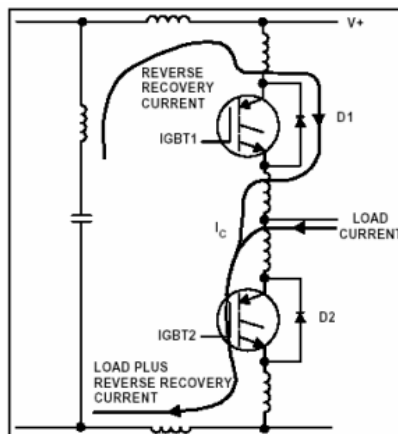
図(3)は従来の部品を使用した回路設計図、図(4)はIPMを使用した回路設計図プランです。どちらも同じ機能を提供しますが、IPMを使用して得られる回路は比較的単純です。実際、図(4)の回路図は主に電源回路と駆動回路の単純化して強調しています。

IPMに対応した補助電源と電流サンプリングの回路をさらに簡略化すると、図(4)に示すように、線の簡略化における違いはさらに大きくなります。

実際の基板に配置された場合は、コンポーネントを使った設計時よりも、IPMは各ノード間の接続の漏れインダクタンスを低減し、IGBTを可能な限り短くする事に貢献できます。

ドライバーICを備えたIPMは、システム設計に於ける課題であるスイッチングストレスとライン障害を低減する事に貢献します。図(5)の回路図を例にとると、IGBTのコレクタとエミッタの接続ノードにはさまざまな浮遊インダクタンスの影響があり、これらの影響を軽減するには、従来のパッケージ品を用いる事が適切な場合もあります。この場合、デバイス間の経路は短くて太い事が理想なので、多層のPCBボードを使用するか、基板の厚さを増やす必要があります。

このような要件を満たすPCBエリアと、IPMはモジュールの成形段階でこれらの浮遊効果を考慮された構造になっています。IGBTまたはパワーMOSFETの各コンポーネントがどんなに近く配置/配線したとしても、IPMの内部に直実装されている素子同士をその内部で接続することに勝るものはありません。同様にリードフレームに直接使用する場合各電源スイッチを接続するためのワイヤボンディングも優れているので、PCB上の銅箔を介した接続方法に比べて、浮遊インダクタンスや寄生成分の影響は遥かに小さくなります。



图(五)

5番目の特徴は、システム設計者を悩ませるウエハ・パッケージング段階（ウエハレベル）のアセンブリ異常制御の問題をIPMが直接解決できることにあります。

メーカーは、システムの組み立てた製品に対して厳格な検査を採用しています。

半導体チップの特性は、組み立て前に測定されます。バラバラに購入してきたコンポーネントを採用する場合、生産および組み立て中に、各パラメーターの偏差によって引き起こされる潜在的な問題を軽減するために、ユーザーは同一な特性を持つコンポーネントをその中から選別してから PCB ボード上に組み立てる必要があります。例えば、上アームのターンオフ遅延とターンオフ時間が仕様を満たしているが、下アームのターンオン特性が真逆である場合、上下のアームが同時ONする事で電力消費が大幅に増加するだけでなく、システム障害を引き起こす事が考えられるからです。さらに、ヒートシンクの設計は、各半導体チップの発熱が同等であるという仮定に基づいていますが、 $V_{(ce)}$  パラメータにも上記の仮定が当てはまる場合、不均一な熱分布によりさらに当初の仮定と異なる場合があります。

しかし、異常なマッチングによって引き起こされる潜在的な問題に対して、デッドタイムを増やしたり、より低い動作温度を得るためにヒートシンクの面積を増やすなどして、設計マージンを確保する事になります。これはシステムのパフォーマンスを低下させ、材料費が増える事を意味します。

半導体メーカーで実施されるウエハ段階のテストでは、各チップの特性分布マップが作成されますが、ウエハ上の各チップがダイシングされてTO220 または TO247 タイプにパッケージ化された後、この特性分布情報はトラッキングできなくなります。IPM の場合、隣接するチップの特性に最も近いチップをペアで使用します。この事により、IPMモジュール内にペアで実装されたチップ同士はその特性の対称性と整合性を確保できます。

(6) 番目の項目は、(4) 番の項目と密接に関わっています。

スイッチング特性であるnSレベルの違い、システムの誤動作の回避、および最適な保護は、システム設計者を悩ませます。IPMは浮遊インダクタンスを低減することにより、異常信号そのものの発生を抑え、ノイズ・フィルタ回路の定数を低減させることが出来るので異常信号に対するICの応答速度を向上させることができます。この事は、ノイズによる本来不要な保護を機能させない事にもつ繋がり、システムを安定的に動作させる事に寄与します。

#### 信頼性：

- (1) 複雑な組み立てプロセスによって引き起こされる生産担当者の潜在的な故障を大幅に削減します。
- (2) 従来のパッケージに比べ堅牢な構造を実現
- (3) システム全体の故障率が低くなります。

最初の項目の改善は非常に重要です。従来の部品の組み立て方法は複雑だけでなく、それを何度も繰り返すため、アライメント異常、絶縁ナットの漏れ、内部チップのクラック、絶縁シートの破損などのトラブルを防ぐために多くの検査と工程の管理が必要です。さらに、これらの潜在的な問題は効果的に検出されない可能性があるため、定格の関係により半導体コンポーネントを並列接続する必要がある場合、チップの数が当初の 6 個から 12 個以上に変更される可能性があり、潜在的な故障の可能性は更に高くなりシステムは巨大化していきます。

一般に、各コンポーネント部品は、ネジのロック時やピンの折り曲げ加工時、あるいは完成品の出荷/輸送時の時などに発生した応力は端子を介して内部チップに容易に到達する可能性があります。IPM はバラバラなコンポーネント部品を沢山実装した場合よりも堅牢な構造を提供します。

3 番目の議論の根拠は、IPM の故障率が従来のコンポーネントの故障率と同程度である場合、従来のコンポーネントを使用すると同等の機能モードを実現するには 20 ~ 30 のコンポーネントが必要となります。システム全体で起こり得る故障率は使用する部品の数に比例するので、コンポーネントを沢山使う方が故障率は増加する事になります。

#### 量産費用：

- (1) 信頼性向上による品質コストの削減
- (2) デザイナーの製品開発期間を大幅に短縮
- (3) ヒートシンクの穴あけ加工とPCB基板のコストを削減
- (4) 生産担当者の組立・検査時間の短縮

上記の利点を想像することは難しくありませんが、定量的には、設計の開発手順と品質コストに従って詳しく計算する必要があります。

## 2. IPMを選ぶ際の注意点

IPM を設計として使用することには多くの利点がありますが、IPMは依然として従来のディスプレイ。コンポーネントほど習得するのが簡単ではありません。

サプライチェーンの考慮：

- (1) サプライヤーの工程異常管理能力
- (2) 仕入先欠品時の代替案の有無
- (3) サプライヤーの技術サポートとサプライチェーン全体の品質保証の仕組み
- (4) 市場からのフィードバックに対する改善と管理

モジュール自体の設計にかかわる考慮：

- (1) パッケージ構造
- (2) 内部部品の配置が合理的かどうか
- (3) ペリフェラルコロケーション回路の設計は分かりやすいか
- (4) ドライバICやパワー半導体結晶の強度

このアプリケーションNOTEでは、モジュール本体の関連部分の要点を説明します。



## パッケージ構造：

### 優れたパワーパッケージ設計の特徴

優れたパワーパッケージ設計には、高い構造強度、シンプルな製造プロセス、高い絶縁性、容易な熱伝導、低い熱抵抗などの特徴があります。構造強度が高いかどうかは、モジュールの内部構造の接合面と材料システムが、急激な熱変化や長期にわたる機械的振動の条件下で欠陥や故障を起こしやすいかどうかを決定します。製造プロセスの単純さは、製造プロセスが異常をより適切に制御できることを示しており、同時に、製造プロセスの潜在的な欠陥の検出が容易です。熱が伝わりやすい条件とは、半導体素子が瞬間的に大きな電力を消費するとき（短絡やスイッチング異常など）、その熱を瞬時に放散し、半導体素子がヒートスポット現象を起こさないようにすることです。低い熱抵抗とは、発熱体が熱平衡の定常状態に達した後に熱を放散し、熱の蓄積を引き起こさず、モジュールの早期故障を引き起こさないようにすることです。

### 各種パワーパッケージ構造の違い：

図(7)、図(8)、および図(9)は、現在市場にあるIPMのいくつかの典型的なパッケージ構造を表しています。



図(7)

図(8)

図(9)

これら3つの構造の長所と短所を検証します。

図(7)の構造は、ドライバICとパワー半導体をリードフレーム(Lead Frame)上に同一平面上に配置し、セラミック基板を直接ヒートシンクへの絶縁と熱伝導の材料として利用したものです。個別コンポーネントのモールディングコンパウンドと同様のパッケージが構造全体をカバーします。この梱包構造はシンプルで強度が高いと言えますが、以下のような注意が必要な部分があります。

1つ目は、セラミック基板は絶縁性は高いものの、熱が伝わりやすい素材ではなく、瞬間的なホットスポットを分散させる効果が相対的に乏しいため、パワー半導体を搭載したリードフレームが耐熱性を発揮できるかどうか懸念されます。ホットスポットを作らず瞬間的な熱伝導を実現する点は特に注意が必要です。セラミック基板の熱抵抗は、同じ厚さの銅はもちろんのこと、アルミニウムの熱抵抗よりもはるかに高いので、放熱用のヒートシンク温度が同じである場合、モジュール内のチップ温度はアルミニウムや銅を使用したモジュールよりも高いことを意味します。図(1)の構造の場合、設計者はサプライヤーの仕様を完全に信頼すべきではなく、設計を保証する唯一の方法は自己測定であるといえます。



2つ目はセラミック基板を溶接実装している場合です。

長期間使用すると、半導体の温度が正常に外部に伝搬できなくなり、最終的に焼けてしまう現象（Delimitation）が発生するかどうか懸念されます。設計者は、この点に関するテスト条件をサプライヤーに要求し、それを自社の実際のシステム条件と比較できます。サプライヤーのテスト実験と実際のシステム動作と相関関係が見いだせない場合、設計者は自身が設計しているシステムを使って実験し、確認することをお勧めします。

3つ目はセラミック基板のクラックや厚み異常の問題です。一般にセラミック基板は厚いほど割れにくく、たとえ割れたとしても完全な亀裂を生じることは稀です。

電源端子や信号端子から発生する高電圧は、モジュール表面に取り付けられた放熱板に直接漏電します。したがって、このような設計では安全性テストにそれほど多くの問題は発生しないはずですが、さらに、セラミック基板の熱伝導率は銅やアルミニウムほど良くはありませんが、図(8)の構造で使用されるエポキシよりもはるかに優れています。

したがって、個々のモジュールの厚さの異常が放熱性能に与える影響は小さいです。

同時に、温度によりモジュールとヒートシンクの面との間の隙間が目立たなくなり、熱伝導が低下します。

図(8)の構造は、主な放熱経路としてセラミック基板の代わりにアルミニウムブロックを使用しており、理論的には図(7)の構造よりも優れた熱伝導率を持つはずですが、ただし、図(8)の構造では、IPM内部の高電圧を実現し、熱伝導に使用されるアルミブロックから絶縁するために二重モールドプロセスが使用されていることに注意する必要があります。

つまり、チップとリードフレームをボンディングした後、まず一度モールド材が流し込まれ、1次充填が完了した半完成品の上にアルミブロックを置き、再度型にモールド材を充填します。この場合、注意しなければならない重要な項目がいくつかあります。

1つ目は絶縁性接着剤層の厚みの制御です。モールド充填に使用される絶縁接着剤は、絶縁性は高いものの、熱伝導率が低いという特徴があります。厚み制御誤差が大きすぎると、各モジュールの熱伝導率や熱抵抗に大きな影響を与えます。

2つ目は、アルミブロックの平面曲率の異常や温度による変形により、ヒートシンクの平面に隙間が生じることですが、これも注意が必要な重要な項目です。著者の経験では、このようなモジュールを使用する設計者はサーマルペーストを使用してこの部品の影響を軽減できます。ただし、アルミニウムブロックの熱膨張係数は、パッケージングに使用される接着剤の熱膨張係数よりもはるかに高くなります。

同じ体積のアルミニウムブロックの変形によって生じる応力もセラミック基板の応力よりもはるかに大きくなります。図(8)の改良版は、アルミブロックを銅ブロックに変更し、いくつかに分割してリードフレームを直接接合したものです。工程の最後に、成形されたコロイドを使用して、IPM内部の高電圧と外部との間に絶縁が提供されます。

この変更により、図(8)の構造と同様の熱抵抗性能を維持できますが、瞬間的な熱伝導率が向上し、銅全体の歪みによって引き起こされるモジュール全体の応力が軽減されます。銅のブロックがあるので、モジュールとヒートシンクの固定面がより滑らかになります。同時に、熱による変形の問題も大幅に改善されます。図(9)の構造は、リードフレームのパワーチップを載せる部分を直接載せる構造(ダウンセット)で、ドライバーICを搭載したリードフレームとパワーチップが2つの異なる面を形成します。

リードフレームを下げる目的は、パワーチップを搭載した面を IPM コロイドとヒートシンクの接触面に非常に近づけることです。

このような構造設計により、モールド注入後に他の材料の追加や派生プロセスを必要とせず、直接ポッティングおよびカプセル化が可能になります。この構造は、さまざまな構造の中で最も単純で経済的です。絶縁接着剤の厚さの制御を適切にすれば、瞬間的な熱伝導性能も期待できます。設計者にはシステムのヒートシンクはモジュールの制限範囲である事と、実際のシステムの最大動作温度、および動作電圧を確認することをお勧めします。

内部コンポーネントのレイアウトは適切ですか？：

リードフレーム上の熱源（主にパワーチップ）の配置が均一な熱分布を実現しているかどうか、ブリッジ回路のパワーチップの駆動遅延が一致しているか、電流が流れているかどうかなど、内部部品のレイアウトが合理的であるかどうかを確認します。

IPMの仕様書に推奨システムが記載されている事に気が付くと思います。例えばDC バス (DC-Link) の電圧は 450V を超えてはならず、スイッチング電圧は制限範囲の 500V を超えてはなりません。これは、IPM内部にはボンディングワイヤやリードフレームによって形成される等価リーケージインダクタンスが存在するため、スイッチが切り替わると電流の変化により電圧が急激に変化します。内部の電圧降下は、IPMの外部端子で測定される電圧よりもはるかに大きくなる可能性があります。内部電源チップの電圧降下が定格 600V を超えないようにするために、様々な制限範囲が設定されています。

しかし、実際には、リードフレームやボンディングワイヤの漏れインダクタンスは10~20nH程度であり、IPMスイッチの電流変化率が400A/us（通常は200A/us~300A/us）を超えることはほとんどありません。電圧変動による端子電圧と内部 IGBT の電圧差は 10V 未満である必要があります。さらに、600V の定格が付いているほとんどすべての IGBT には 100V 以上のマージンがあります。

IPM の安全を確保するために、安全動作領域の範囲内で収まるように設計にしてください。瞬時電流の推定が難しい場合、P-N 端子間の電圧差を低くすることが重要です。

IPMの安全動作領域と、そのIPMが使われている最終的なアプリケーションの動作範囲の定義と測定、および故障率の関係は、IPM に限った問題ではなく、ディスクリート パッケージングにおいても深く関係しています。

### 3. パリフェラル回路の設計

ほとんどの IPM パリフェラル構成は、回路設計にほとんど違いがありません。一般に、図に示すリファレンス設計に従って、上アームの 3 つの浮遊充電ソースと短絡保護抵抗に正しいコンポーネントを配置することのみです。そして6つのアーム駆動用の信号をせ接続して完了です。ただし、各社のモジュールが本当にリファレンスマニュアルに記載されているほど簡単に設計できるかどうかは必ずしも明らかではありません。実際、この部分の判断基準は、モジュールが選択した半導体部品とシステムアプリケーションの条件によって判断する必要があります。IPM が選択した特殊なドライバー IC によって発生する可能性のある問題には特に注意を払う必要があります。

この部分については 参考文献 [2]に非常に詳細な説明があります。

正論理駆動と負論理駆動のそれぞれの信頼性についても理解しておく必要があります。著者が上級デザインディレクターに会った時、彼は「正論理ドライブは負論理ドライブよりもはるかに信頼性が高い」と考えていました。実は負論理はノイズ誤動作に対して性能が高く、MCUドライバのストレスを軽減することができます。正論理駆動は、電源異常時に IPM のスイッチを安全にオフにすることができます。つまり、2 つの駆動方法にはそれぞれ長所と短所があり、どちらがより信頼性が高いかについて議論することはできません。

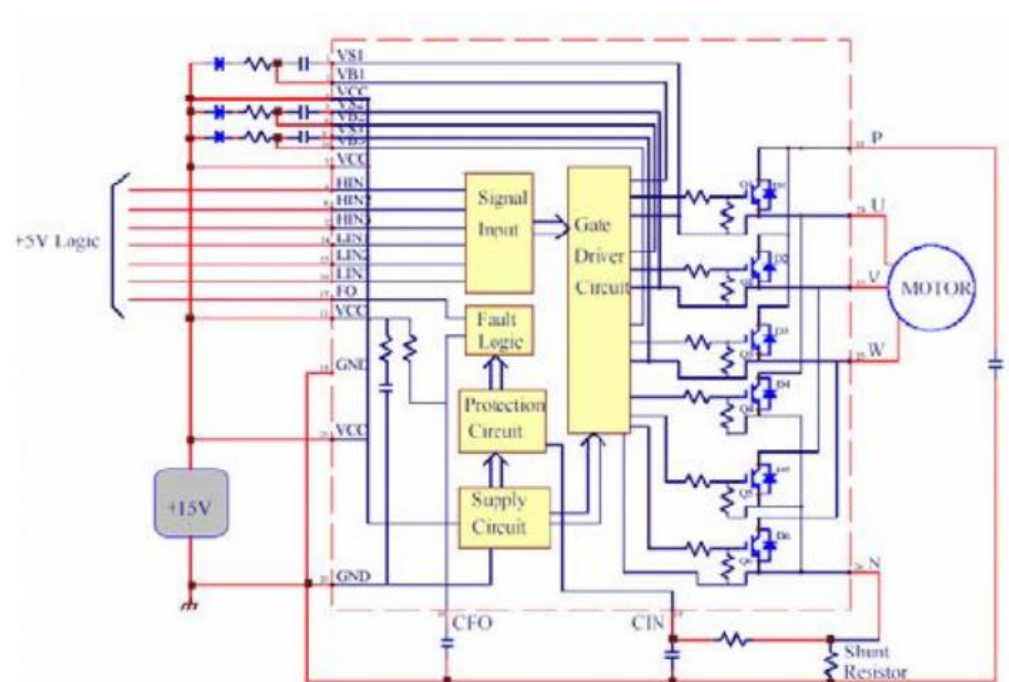


図 (11)

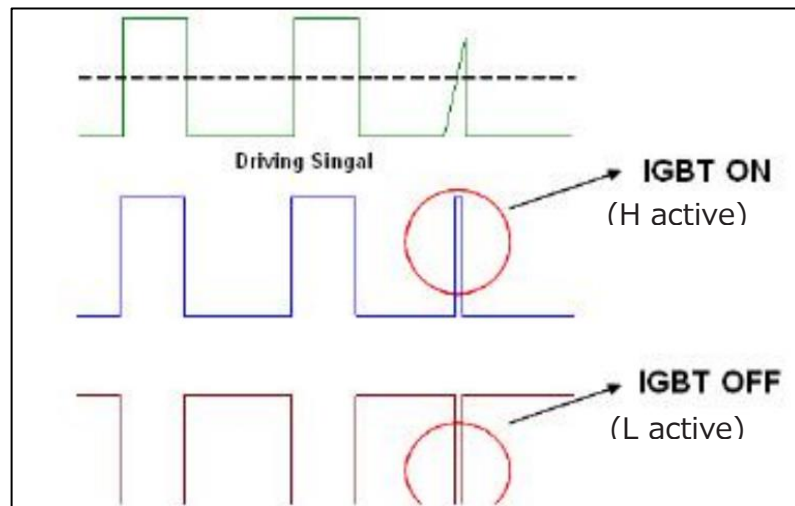


図 (12)

図 (12) を参照すると、ノイズレベルが IPM の閾値を超えると、負論理のメカニズムでは IGBT がオフになりますが、正論理のメカニズムでは IGBT がオンになることがわかります。

一般的に上アームと下アームのスイッチ状態は相補的なため、負論理で駆動する IPM の場合、数  $\mu$  秒間オンすべき IGBT をオフにするだけで、せいぜい電圧利用率を少し下げることができますが、正論理駆動の IPM について IPM は上下同時導通や短絡（アームシュートスルー）の危険性があります。

なお、ダイレクトドライブ設計の場合、負論理ドライブにはプルアップ抵抗 (Pull Up Resistor) を設ける必要があります。しかし、一般的な MCU の駆動能力はシンク能力に比べて弱いのが一般的で、それはおよそ  $1/5 \sim 1/10$  くらいです。

したがって、MCU の駆動ポート (出力ポート) が大きな出力電流を必要とする場合、正論理駆動となり、駆動レベルが異常となる危険性があります。

ただし、負論理ドライバがハイレベルを出力している場合、ドライバポートはハイインピーダンスとなり、プルアップ抵抗の電源により駆動電流が供給されるため、正論理ドライバでは問題ありません。

ドライバーICやパワー半導体の高信頼性：

IPM は、パッケージの種類を変更することで従来のコンポーネントにはない多くの利点を提供しますが、半導体の本質的な機能や特性は変更しないことに注意する必要があります。したがって、選択したドライバー IC やパワー半導体に制限や欠陥がある場合、IPM にも必然的にこれらの制限や欠陥が付いて回ります。

例えば、

電源スイッチが非貫通 (NPT) テクノロジーを使用した IGBTと貫通 (PT) テクノロジーを使用した IGBT を比べた場合、2 つの IPM の特性は多少異なります。最近人気のトレンチ技術(Trench Technology)も貫通型の派生技術で、従来の貫通型IGBTのスイッチング速度が遅いという欠点を大幅に改善しましたが、短絡電流耐性も弱く、さまざまなパラメータが制限され、温度変化に敏感です。使用するドライバーICも同様で、温度変化の範囲、 $di/dt$ 、 $dv/dt$ 、瞬時的な負圧等の限界範囲を十分に把握できれば、選定することが可能です。システム アプリケーションの要件に適した IPM があれば、この設計は半分以上終わっている事になります。

温度、振動、電圧、電流のストレスが組み合わされたシステムの総合的な検証をすると設計の欠陥を検出しやすくなります。

しかし、故障の原因を解析するのは大変です。ディスクリートコンポーネントの設計において、さまざまなコンポーネントの特性の違いがシステムに与える影響を設計者が明確に理解している場合は、サプライヤーに、対象となる半導体の仕様や信頼性検証データなどを依頼することをお勧めします。従来のディスクリート・コンポーネントにおける設計と検証の経験は、IPM を検証して、障害の原因を見つけるのに非常に役立つと考えられています。

## 4. まとめ

IPM は三相モータードライバーまたは 3 アーム (Three-Arm トポロジー) などを提供し、システム設計を簡素化し、パワーオフ電源システムの電力密度 (Power Density) を向上させるソリューションです。しかし、そのパッケージ仕様や製造プロセスは独特です。部品単体のコストという点では、標準化され量産化されているディスクリートパッケージ部品に対抗することはまだ難しいと思われませんが、市場の要求が高いため更に多くの製品がリリースされる事が予想されます。

このアプリケーションノートは、IPM を使用することによって得られる利点や信頼性、および全体的なコストの違いを明確に説明するだけでなく、モジュール メーカーの設計者の立場とシステム設計者の視点で記載することで、読者が IPM を選択する際に包括的に理解できるようにしています。IPM の使用に興味がある、または使用したことのある読者が今後、この業界の設計レベルを高めていく事を期待します。